



PENGASUTAN MOTOR INDUKSI DAYA BESAR DENGAN MENGGUNAKAN KAPASITOR

Rafael Sianipar

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti

Jalan Kiai Tapa 1, Jakarta Barat 11440

Email: rafael@trisakti.ac.id

ABSTRACT

The increasing number of large induction motors use as production equipment is realized to lower the electric quality due to electric shock every time the motor are started directly to the grid. It will adversely affect the performance of production machines around them so it is necessary to overcome the electric shock technically. When a large induction motor is started, it has highly inductive nature which indicates that a large reactive power is required. The severe electric shock can be avoided if the reactive power demand in the conductors can be compensated from outside of the system. The discussion shows that the use of capacitors is able to reduce the voltage shock whenever a large induction motor is started directly to the grid.

Keywords: direct starting, reactive power compensation, capacitor start.

ABSTRAK

Penggunaan peralatan produksi yang digerakan oleh motor induksi yang semakin bertambah banyak disadari akan menurunkan mutu listrik akibat timbulnya guncangan tegangan setiap kali dilakukan pengasutan motor secara langsung. Hal tersebut akan berdampak buruk terhadap kinerja mesin produksi lain disekitarnya sehingga perlu suatu upaya teknis untuk mengatasinya. Setiap motor induksi besar pada awal dijalankan bersifat sangat induktif, yang mengindikasikan adanya kebutuhan daya reaktif yang besar. Guncangan tegangan yang besar dapat dikurangi jika aliran kebutuhan daya reaktif dalam penghantar dikompensasi dari luar sistem. Dari pembahasan diperoleh kesimpulan bahwa penggunaan kapasitor saat pengasutan mampu mengurangi guncangan tegangan setiap kali motor induksi besar diasut langsung ke jala-jala.

Kata kunci: pengasutan motor secara langsung, kebutuhan daya reaktif, kapasitor saat pengasutan

1. PENDAHULUAN

Untuk memiliki kemampuan bersaing yang kuat, suatu industri perlu ketersediaan listrik berkualitas baik, sehingga dapat menghasilkan produksi yang bermutu tinggi. Rendahnya mutu listrik sering menjadi dilema antara perusahaan utilitas listrik dan konsumen. Di satu sisi konsumen yang merasa dirugikan ingin mengajukan klaim dan sebaliknya perusahaan utilitas listrik tidak begitu saja untuk menerimanya, karena rendahnya kualitas listrik dapat dipicu dari kedua belah pihak. Kenyataannya perbaikan dari pihak pemasok seringkali tidak sesuai harapan sehingga perbaikan mutu terpaksa dilakukan pihak konsumen.

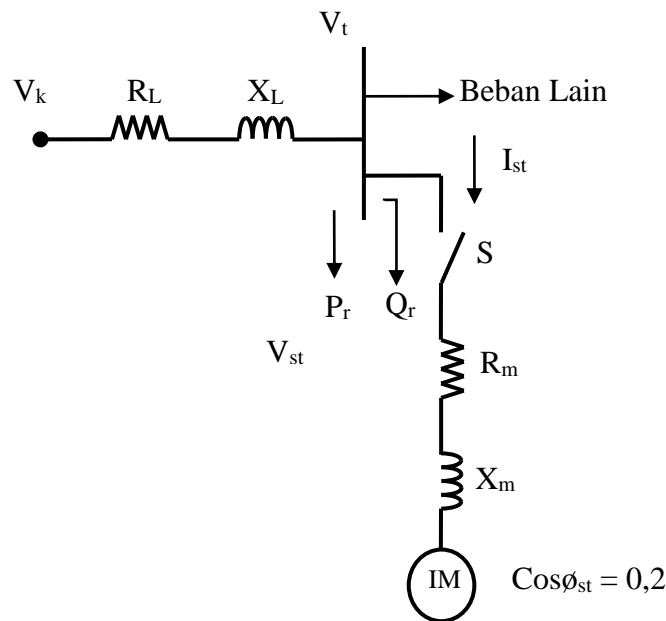
Kedip tegangan (*voltage dips*) atau sering disebut guncangan tegangan adalah salah satu parameter mutu listrik yang paling penting. Gejala ini sangat mengganggu khususnya bagi pengguna peralatan-peralatan yang sensitif terhadap perubahan tegangan. Kedip tegangan umumnya diakibatkan gangguan hubung singkat, perubahan beban yang besar secara tiba-tiba dan juga pengasutan secara langsung motor-motor besar ke jaringan listrik dimana pada keadaan tersebut selalu timbul fluktuasi tegangan yang tinggi. Hal yang terakhir merupakan topik pembahasan utama dalam tulisan ini mengingat banyaknya penggunaan motor-motor listrik besar sebagai penggerak mesin produksi di industri yang beroperasi secara langsung ke jaringan listrik sehingga menjadi sumber gangguan tegangan di sekitarnya.

2. PEMODELAN MOTOR LISTRIK SEBAGAI KOMPONEN JARINGAN

Motor-motor listrik sebagai tenaga penggerak produksi merupakan suatu titik hubung antara pemakai dan penyalur. Pemilihan motor adalah bagian dari analisis pemakaian dan harus dilengkapi neraca penggunaan energy listrik berdasarkan perencanaan yang akan disampaikan sebagai permintaan daya kepada pihak penyalur. Masalah pemilihan dimensi motor-motor dan peralatannya merupakan bidang teknik mesin penggerak dan data-data motor mesin penggerak tersebut merupakan parameter motor yang berfungsi sebagai pemakai tenaga listrik dari jaringan yang pada akhirnya dinyatakan sebagai parameter (motor) komponen jaringan.

2.1. Pengasutan Motor Induksi [1, 3]

Sebuah motor induksi dijalankan dengan menghubungkan secara langsung ke sistem tenaga, seperti Gambar 1.



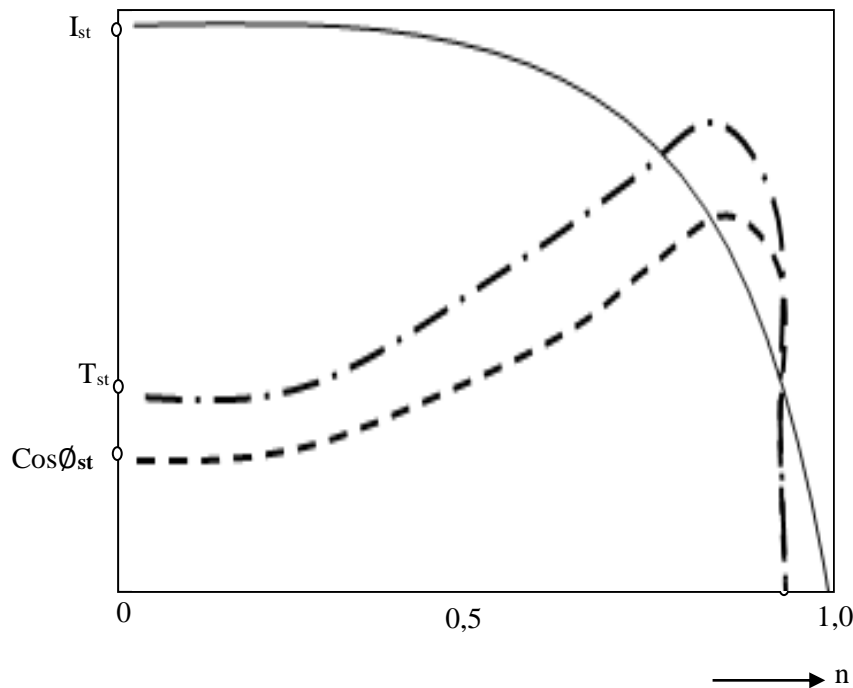
Gambar 1. Pengasutan langsung motor induksi

Pada waktu motor dihubungkan dengan tegangan sistem maka arus asut yang besar dan sangat induktif, karena faktor daya yang kecil, ditarik dari jaringan untuk membangkitkan fluksi magnet dalam stator motor yang besarnya ditentukan dengan persamaan (1):

$$I_{st} = \frac{V_t}{\sqrt{3} Z_m} \quad (1)$$

dimana: I_{st} adalah arus asut [ampere], V_t adalah tegangan terminal [volt] dan Z_m adalah impedansi motor induksi [ohm].

Diketahui bahwa impedansi motor, Z_m , pada saat mulai dijalankan sangat kecil sehingga akan menarik arus asut I_{st} yang besar dari jaringan, dimana $\frac{I_{st}}{I_n} = 2$ sampai dengan 7 dan berkurang saat menuju putaran nominal, seperti Gambar 2 karena adanya pertambahan reaktansi motor dari keadaan transien X'_m ke reaktansi stasioner X_m .



Gambar 2. Karakteristik I, T dan $\cos \phi$ motor induksi

Jalannya torsi atau momen motor, T dan faktor daya, $\cos \phi$ sebagai fungsi putaran, n merupakan pernyataan fungsi motor yang sangat penting sebagai komponen jaringan. Akibat lonjakan arus asut motor yang besar maka timbul guncangan rugi tegangan atau fluktuasi tegangan dalam penghantar motor, secara pendekatan dinyatakan dengan persamaan (2):

$$\Delta V_{d(st)} = I_{st} R_s \cos \phi_{st} + I_{st} X_s \sin \phi_{st} \quad (2)$$

dimana: $\Delta V_{d(st)}$ adalah rugi tegangan pengasutan [volt], I_{st} adalah arus pengasutan [ampere], R_s , X_s adalah impedansi penghantar [ohm], dan $\cos \phi$ adalah faktor daya waktu pengasutan.

Bila naik turun tegangan hanya $\pm 10\%$, maka pada umumnya motor dapat dipakai tanpa gangguan praktis pada daya output nominal. Akan tetapi, pada keadaan ini karakteristik akan berubah seperti diperlihatkan dalam Tabel 1 dan fakta ini harus diperhatikan dalam pemilihan dan kerja motor.

Tabel 1. Perubahan karakteristik akibat fluktuasi tegangan [5]

Karakteristik	Fluktuasi Tegangan	
	+10%	-10%
Kopel Asut	+21%	-19%
Perputaran sinkron	Tidak Berubah	Tidak Berubah
Perputaran Beban Penuh	+5 ~ 3%	-5 ~ 3%
Arus Beban Penuh	+0 ~ 7%	+5 ~ 15%
Arus Asut	+10%	-10%
Keluaran Maksimum	+21%	-19%
Kopel Maksimum	+21%	-19%
Kenaikan Suhu	-2 ~ +10°C	+1 ~ 7°C

2.2. Rugi Tegangan Dalam Besaran Daya [2]

Rugi tegangan dalam penghantar dapat juga dinyatakan dalam besaran daya. Dari Gambar 1, daya kompleks yang diterima oleh motor saat pengasutan dinyatakan dengan persamaan (3):

$$P_r + jQ_r = V_t I_{st}^* \quad (3)$$

Jika I_{st}^* adalah konjugate dari, I_{st} maka arus pengasutan dihitung dengan persamaan (4)

$$I_{st} = \frac{P_r - jQ_r}{V_t} \quad (4)$$

Sehingga tegangan ujung kirim, V_k [volt] dapat dinyatakan dengan persamaan (5):

$$V_k = V_t + I_{st} Z_s \quad (5)$$

atau

$$V_k = V_t + \left(\frac{P_r - jQ_r}{V_t} \right) (R_s + jX_s) \quad (6)$$

Dengan mengabaikan bagian imajiner hasil perkalian bagian bilangan kompleks dari persamaan (6), maka tegangan ujung kirim dapat dinyatakan seperti persamaan (7):

$$V_k = V_t + \frac{R_s P_r + X_s Q_r}{V_t} \quad (7)$$

Sehingga rugi tegangan dinyatakan dalam besaran daya seperti dalam persamaan (8):

$$\begin{aligned}\Delta Vd_{st} &= V_k - V_t \\ &= \frac{R_s P_r + X_s P_r}{V_t}\end{aligned}\quad (8)$$

dimana: ΔVd_{st} adalah rugi tegangan pengasutan [volt], P_r dan Q_r adalah masing-masing daya aktif dan daya reaktif [watt] dan [var], Z_s adalah impedansi penghantar [ohm], V_k dan V_t adalah masing-masing tegangan kirim dan tegangan terima [volt].

Dari persamaan (8) dapat disimpulkan bahwa dengan mengatur daya reaktif maka rugi tegangan mudah untuk dikendalikan.

2.3. Pengaruh Tegangan Terhadap Torsi Motor [8]

Secara matematis, torsi motor induksi dapat dihitung dengan persamaan (9):

$$T = K \cdot E_r I_r \cos \varphi_r \quad (9)$$

dimana: E_r adalah tegangan rotor [volt], I_r arus rotor [ampere], $\cos \varphi_r$ adalah faktor daya rotor, K_i adalah konstanta, R_r , X_r adalah tahanan dan reaktansi rotor [ohm]

Selanjutnya diturunkan persamaan torsi rotor pada keadaan diam siap berputar yang disebut torsi asut, T_{st} dinyatakan dengan persamaan (10):

$$T_{st} = K_2 \frac{E_r^2 R_r}{R_r^2 + X_r^2} \quad (10)$$

Diketahui bahwa tegangan suplai V , berbanding lurus dengan tegangan rotor, R_r atau $E_r \approx V$, sehingga persamaan torsi secara pendekatan seperti persamaan (11):

$$T_{st} = K_3 \frac{V^2 R_r}{R_r^2 + X_r^2} \quad (11)$$

Persamaan (11) menjelaskan bahwa torsi motor induksi sangat sensitif terhadap perubahan tegangan suplai.

2.4. Pengaruh Lama Pengasutan [5, 7]

Lamanya pengasutan sangat dipengaruhi oleh GD^2 (dampak roda gila) motor itu sendiri dan torsi percepatan yang diperlihatkan pada persamaan (12):

$$T_{\text{start}} = \frac{100}{T_m - T_l} \times \frac{GD^2 (N_o / 1000)}{KW} \times 2,74 \quad (12)$$

dimana: T_{start} adalah lama waktu pengasutan [detik], T_m adalah torsi motor selama percepatan [%], T_l adalah torsi beban selama percepatan, (%), GD^2 adalah dampak roda gila [kg-m^2], N_o adalah kecepatan Sinkron [RPM], KW adalah keluaran motor [KW].

Dampak roda gila (GD^2) sebuah motor adalah suatu konstanta yang menghubungkan gaya putar, waktu dan perubahan kecepatan. GD^2 senantiasa menghambat akselerasi putaran motor karena itu salah satu hal penting untuk diperhatikan ialah lamanya waktu menjalankan sebuah motor sampai putaran nominal.

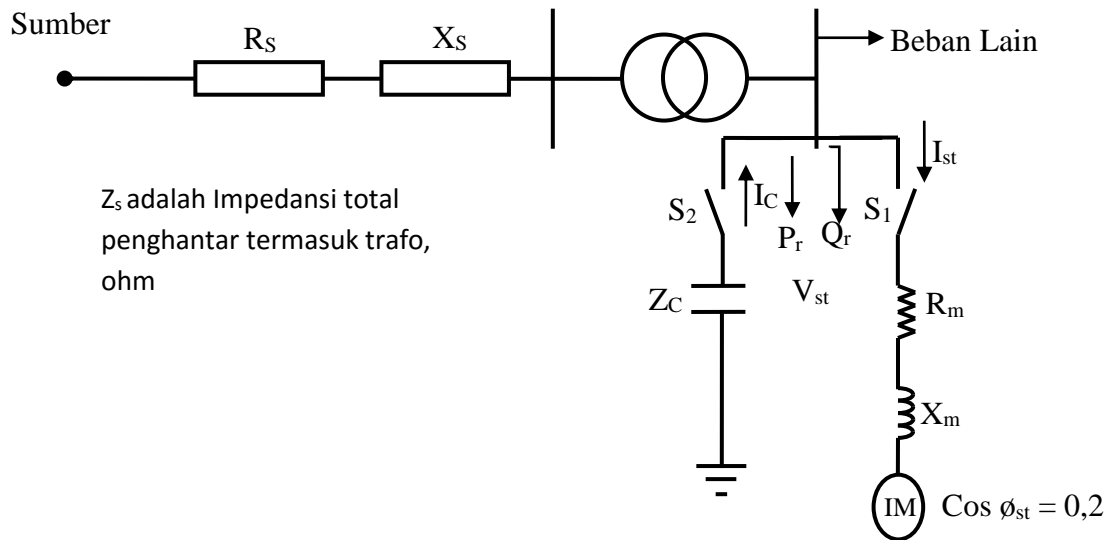
Pengasutan motor harus diselesaikan dalam waktu yang tidak dapat mempengaruhi umur kumparan motor, akibat panas yang naik sebanding dengan lamanya waktu pengasutan seperti dalam persamaan (13):

$$J = I_{\text{st}}^2 R t_{\text{an}} \text{ joule} \quad (13)$$

Sehingga dalam pemilihan motor diharuskan lebih dulu meneliti besar GD^2 nya sebab sangat berpengaruh terhadap timbulnya panas lebih selama pengasutan.

2.5. Pengaruh Kapasitor Pada Pengasutan Motor [2]

Telah diketahui bahwa untuk membatasi guncangan rugi tegangan dapat dilakukan dengan mereduksi aliran daya reaktif dalam penghantar selama pengasutan, seperti persamaan (8) secara teknis hal ini dapat dilakukan dengan menginjeksi arus reaktif kompensasi ke dalam sistem dengan menggunakan kapasitor yang diparalel dengan motor, seperti Gambar 3:



Gambar 3. Skema pengasutan motor dengan kapasitor

Pada saat motor diasut tanpa kapasitor (S_1 tutup, S_2 buka) maka rugi tegangan dalam penghantar dinyatakan dengan persamaan (14):

$$\Delta V'd_{(st)} = I_{st} R_s \cos \phi_{st} + I_{st} X_s \sin \phi_{st} \quad (14)$$

atau

$$\Delta Vd_{(st)} = I_r R_s + I_x X_s \quad (15)$$

Dan saat motor diasut dengan kapasitor (S_1 dan S_2 tutup), maka rugi tegangan dalam penghantar akan berkurang seperti pada persamaan (16):

$$\Delta V''d_{(st)} = I_r R_s + (I_x - I_c) X_s \quad (16)$$

atau

$$\Delta Vd_{(st)} = I_r R_s + I_x X_s - I_c X_s \quad (17)$$

Pada kapasitor C terjadi kenaikan tegangan sebesar selisih persamaan (15) dengan persamaan (17) yang dinyatakan dengan persamaan (18):

$$\Delta V_c = I_c X_s \quad (18)$$



atau persen kenaikan tegangan dalam besaran daya seperti dalam persamaan (19):

$$(\Delta V_c)\% = \frac{L \cdot x \cdot Q_c}{10 \text{ KV}^2} \times 100\% \quad (19)$$

dimana: ΔV_c (%) adalah kenaikan tegangan akibat kapasitor [%], L adalah panjang penghantar [km], x adalah reaktansi penghantar [ohm/km], Q_c adalah daya reaktif kapasitor [kvar] dan KV adalah tegangan kapasitor [kv].

Pada putaran motor telah mencapai nominal (beberapa mili detik kemudian) kapasitor segera dilepas dan perlu diperhatikan kemungkinan terjadinya resonansi sebagai akibat masuknya komponen kapasitif ke dalam suatu sistem yang induktif.

2.6. Persoalan Dalam Pengasutan Motor Induksi

Dari analisis pengasutan motor induksi pada bagian sebelumnya dapat diketahui beberapa masalah penting yang timbul yaitu: turunnya tegangan terminal motor, kenaikan arus secara mendadak dan bertambahnya waktu pengasutan pada mesin dengan GD^2 yang besar.

Dengan turunnya tegangan motor akan menimbulkan dua problem. Pertama adalah semua motor penggerak peralatan produksi yang sensitif tegangan akan mengalami gangguan kerja. Kedua adalah waktu pengasutan yang semakin lama akibat berkurangnya torsi percepatan sehingga dapat menimbulkan panas lebih dalam motor. Selain itu, arus asut yang melonjak secara tiba-tiba membangkitkan torsi asut yang besar dan menyentak sehingga berpotensi merusak mesin beban dan motor itu sendiri. Sedangkan, mesin dengan GD^2 yang besar dapat membangkitkan panas lebih dalam kumparan motor akibat terjadinya perlambatan waktu pengasutan.

Untuk mengatasi problem tersebut maka dipilih salah satu cara yaitu dengan mengasut motor secara langsung pada tegangan penuh gejala-gejala.

2.7. Pengasutan Dengan Tegangan Penuh

Pengasutan motor yang sesuai dengan tegangan nominal disebut juga pengasutan langsung, cara ini memberi beberapa keuntungan yaitu: torsi awal motor besar, waktu pengasutan cukup singkat dan panas yang ditimbulkan kecil.

Cara pengasutan langsung memiliki tingkat keamanan yang tinggi hanya terhadap motor-motor berkapasitas kecil. Namun untuk motor-motor besar (>10 KW) cukup berbahaya, sehingga agar terlaksana dengan baik dan aman maka persyaratan tersebut dibawah ini harus terpenuhi.

1. Sumber daya harus tahan terhadap arus asut yang tinggi.
2. Mampu menahan kejutan torsi asut/awal yang besar.
3. Torsi percepatan awal harus cukup besar agar batas pemanasan termis motor tidak dilampaui.
4. Tidak terjadi penurunan tegangan yang besar saat menjalankan motor.

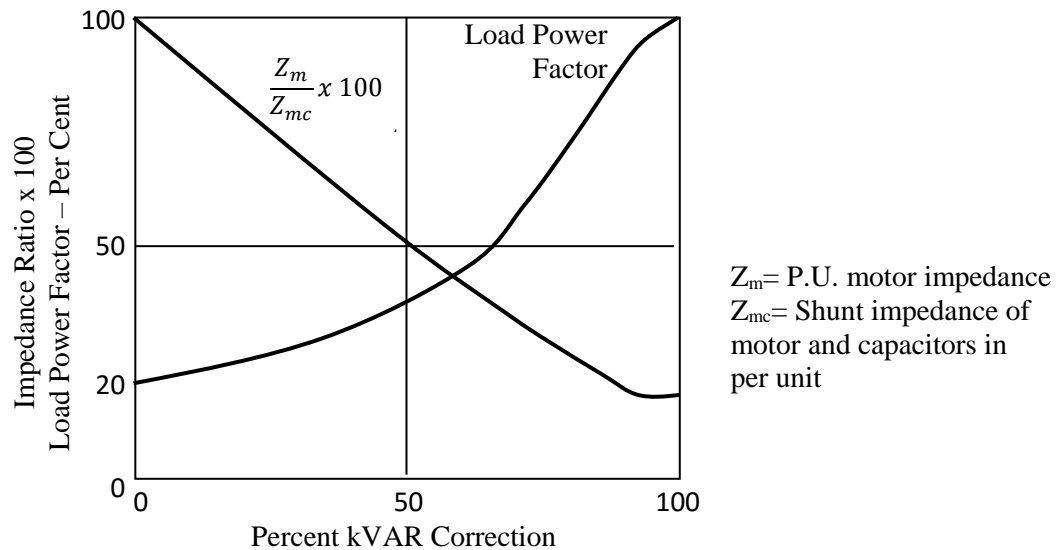
Dengan menganalisis sistem pelayanan motor selama pengasutan diperoleh kesimpulan, bahwa untuk menjalankan motor-motor besar dengan aman pada tegangan penuh harus diupayakan suatu sarana penunjang yang dapat berfungsi mempertahankan tegangan agar tetap stabil. Berdasarkan persamaan yang dapat dijelaskan bahwa dengan menyuntikkan sejumlah daya reaktif ke motor saat pengasutan berlangsung maka stabilitas tegangan dapat dijaga tetap stabil.

2.8. Menghitung Daya Kapasitor Untuk Pengasutan Motor [4, 6]

Untuk menjaga kondisi tegangan sistem tetap stabil maka kapasitas kapasitor untuk pengasutan motor harus diperhitungkan secara tepat. Dengan memperhatikan gambar maka pada waktu motor diasut, arus kapasitor akan segera mengalir mendahului sumber untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif motor, sehingga arus dan rugi tegangan dalam penghantar akan menjadi berkurang. Besarnya kompensasi daya reaktif yang diperlukan dipengaruhi oleh besar impedansi kapasitor yang dapat diperoleh dengan dua metode. Pertama berdasarkan analisis rangkaian, kedua adalah dengan menggunakan kurva karakteristik Z_m/Z_{mc} yang terlihat pada Gambar 4. halaman berikut.

Metode kedua adalah lebih praktis yaitu dengan lebih dulu menentukan perbandingan impedansi motor Z_m dengan impedansi paralel kapasitor dan motor Z_{mc} yang disebut faktor Z_m/Z_{mc} . Dan dari perpotongan harga faktor tersebut dengan

kurva Z_m/Z_{mc} akan didapatkan besar daya kompensasi dari kapasitor yang diperlukan pengasutan motor secara langsung



Gambar 4. Kurva karakteristik Z_m/Z_{mc}

2.9. Menentukan Faktor Z_m/Z_{mc}

Impedansi total suatu sistem dapat ditentukan dengan persamaan (20):

$$Z_{tot} = \frac{(KV)^2}{KVA} \text{ ohm} \quad (20)$$

Dimana KVA adalah batas kapasitas sistem, KV adalah tegangan sistem dan Z_{tot} adalah impedansi total sistem.

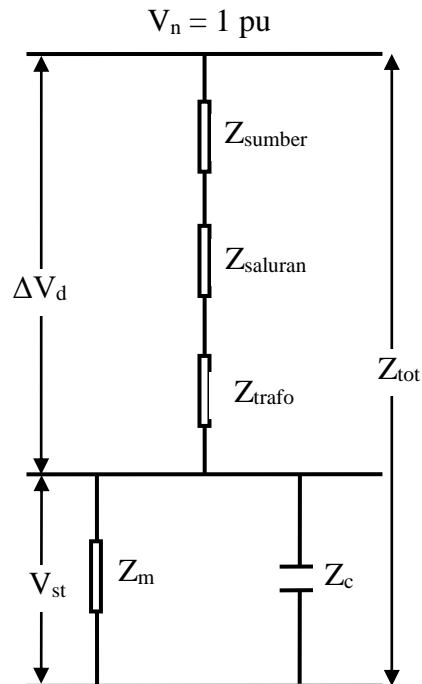
Impedansi dasar (Z_d) ditentukan oleh persamaan (21):

$$Z_d = \frac{(KV_d)^2}{MVA_d} \text{ ohm} \quad (21)$$

Maka total impedansi per unit dapat dihitung dengan persamaan (22):

$$puZ_{tot} = \frac{z_{tot}}{z_d} pu \quad (22)$$

Pada Gambar 5 dibawah ini dilukiskan diagram impedansi ekuivalen sistem pelayanan motor dari Gambar 3.



Gambar 5. Diagram impedansi sistem pada pengasutan motor dengan kapasitor.

Jika:

$$Z_{sst} = Z_{sumber} + Z_{saluran} + Z_{trafo} \quad (23)$$

Dan

$$Z_{tot} = Z_{sst} + Z_{mc} \quad (24)$$

Maka paralel Z_m dan Z_c atau Z_{mc} dapat ditentukan dengan

$$Z_{mc} = Z_{tot} - Z_{sst} \quad (25)$$

Arus nominal motor dihitung dengan seperti persamaan (26):



$$I_n = \frac{HP \times 0,746}{\sqrt{3} \text{ KV } \cos \phi_{\text{eff}}} \text{ ampere} \quad (26)$$

Telah diketahui bahwa arus asut motor induksi (dianggap ekivalen dengan arus hubung singkat) berada dalam rentang seperti persamaan (27):

$$I_{st} = (3 \div 7) I_n \quad (27)$$

Sehingga kapasitas asut motor induksi dapat dihitung dengan persamaan (28):

$$\text{KVA}_{st} = \sqrt{3} \text{ KV } I_{st} \quad (28)$$

Persen reaktansi suatu sistem ditentukan dengan persamaan (29):

$$\% X = \frac{\text{KVA}_d}{\text{KVA}_{hs}} \times 100\% \quad (29)$$

Atau dalam per unit reaktansi seperti persamaan (30):

$$X = \frac{\text{KVA}_d}{\text{KVA}_{hs}} \text{ pu} \quad (30)$$

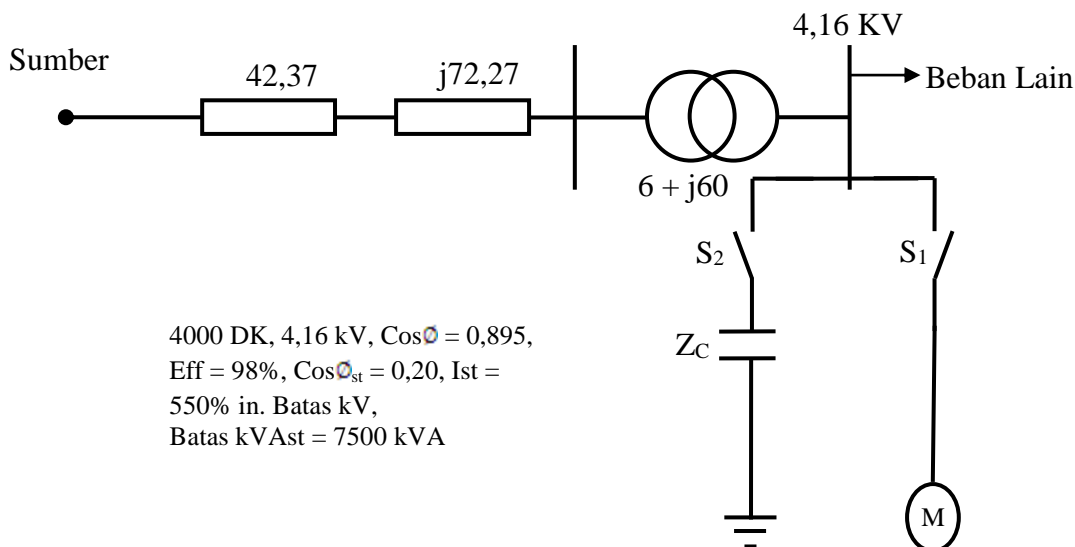
Berdasarkan persamaan diatas maka Impedansi motor (Z_m) pada waktu diasut dapat dihitung dengan persamaan (31):

$$Z_m = \frac{\text{KVA}_d}{\text{KVA}_{st}} \text{ pu} \quad (31)$$

Harga perbandingan Z_m/Z_{mc} dapat ditentukan dan dengan kurva karakteristik Z_m/Z_{mc} besar kompensasi kapasitor dapat diketahui.

3. IMPLEMENTASI KAPASITOR PADA PENGASUTAN MOTOR INDUKSI BESAR

Sebuah motor induksi berdaya besar, dengan data seperti dalam Gambar 6, diperlukan untuk diasut secara langsung ke sistem tenaga guna mengoperasikan peralatan industri secara cepat. Persyaratan tegangan *start* motor minimum 90%. Impedansi sistem dinyatakan dalam per unit pada dasar 10.000 MVA, 4,16 kV. Batas kapasitas pengasutan 7500 kVA. Periksa apakah sistem dalam keadaan aman jika motor tersebut diasut langsung pada tegangan penuh dan jika tidak aman jelaskan upaya untuk mengatasinya.



Gambar 6. Pengasutan motor dengan kapasitor kedalam sistem tenaga

Perhitungan kapasitas asut motor dengan persamaan (28):

$$\text{KVA}_{st} = \sqrt{3} \text{ KV } I_{st}$$



Perhitungan arus nominal motor dengan persamaan (26):

$$\begin{aligned}
 I_n &= \frac{HP \times 0,746}{\sqrt{3} \text{ KV } \cos \phi_{E_{ff}}} \\
 &= \frac{4000 \times 0,746}{\sqrt{3} \times (4,16) \times (0,98) \times (0,895)} \\
 &= 470 \text{ ampere}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan ketentuan yang diberikan maka besar arus pengasutan motor dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 I_{st} &= 550\% \times I_n \\
 &= 5,5 (470) \\
 &= 2585 \text{ ampere}
 \end{aligned}$$

Sehingga kapasitas pengasutan adalah

$$\begin{aligned}
 KVA_{st} &= \sqrt{3} (4,16) (2585) \\
 &= 18603728 \text{ kva}
 \end{aligned}$$

Dan impedansi motor dalam per unit dapat ditentukan dengan persamaan (30):

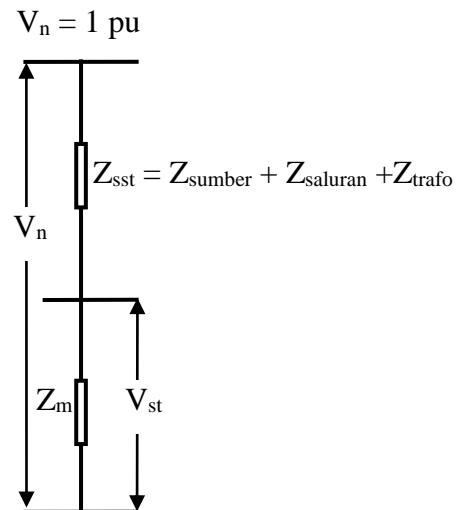
$$\begin{aligned}
 Z_m &= \frac{MVA_d}{MVA_{st}} \\
 &= \frac{10000}{18,6037} \\
 &= 537,50 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Bila faktor daya motor dalam keadaan pengasutan sekitar $\cos \phi_{st} = 0,2$ dengan sudut fasa $\phi_{st} = 78,46^\circ$ maka impedansi motor dapat dinyatakan dengan seperti:

$$Z_m = 537,50 \angle 78,46^\circ \text{ pu}$$

$$= 107,5 + j521,37 \text{ pu}$$

Rangkaian ekivalen impedansi sistem pelayanan motor tanpa kapasitor dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 7. Diagram impedansi sistem pada pengasutan tanpa kapasitor

Dari rangkaian ekivalen, hitung tegangan motor pada waktu pengasutan yaitu:

$$\begin{aligned} V_{st} &= \frac{Z_m}{Z_m + Z_{sst}} \times V_n \\ &= \frac{107,5 + j521,37}{(107,5 + j521) + (42,37 + j72,27) + (6 + j60)} \\ &= 0,793 \text{ pu} \\ &= 79,3\% \end{aligned}$$

Sehingga rugi tegangan dalam penghantar dapat ditentukan sebagai berikut:

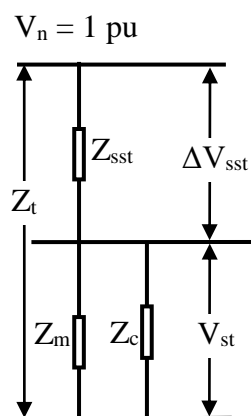
$$\begin{aligned} \Delta V_{sst} &= V_n - V_{st} \\ &= 1 - 0,793 \\ &= 0,207 \text{ pu} \\ &= 20,7\% \end{aligned}$$

Dari analisis tersebut dapat diketahui bahwa kondisi pada saat motor diasut langsung tanpa kapasitor adalah sebagai berikut:

1. KVA pengasutan motor lebih besar dari batas yang diperkenankan yaitu:
18603,728 kVA > 7500 kVA.
2. Tegangan motor pada waktu diasut lebih rendah dari batas yang ditentukan, yaitu: 79,3% < 80%

Kebutuhan daya reaktif motor yang besar pada waktu pengasutan, maka timbulnya goncangan tegangan dalam sistem tidak dapat dihindarkan. Untuk mengatasi hal tersebut maka pada waktu pengasutan berlangsung butuh injeksi daya reaktif ke dalam sistem agar stabilitas tegangan dapat dipertahankan.

Suatu unit kapasitor dengan impedansi Z_c diparalelkan pada sebuah motor besar untuk keperluan pengasutan secara langsung, seperti Gambar 6, dengan diagram impedansi ekuivalen seperti dilukiskan dalam Gambar 8 dibawah ini.



Gambar 8. Diagram impedansi pengasutan dengan kapasitor

Impedansi total Z_T pada dasar daya 7500 kVA adalah:

$$\begin{aligned}
 Z_T &= \frac{(V)^2}{VA_d} \\
 &= \frac{(4360)^2}{7500.000} \\
 &= 2,31 \text{ ohm}
 \end{aligned}$$

Dasar impedansi pada dasar daya 10000 MVA adalah:

$$\begin{aligned} Z_d &= \frac{(KV)^2}{MVA} = \frac{(4,16)^2}{10.000} \\ &= \frac{17.305}{10.000} \text{ ohm} \end{aligned}$$

Sehingga impedansi total Z_T dalam per unit adalah:

$$\begin{aligned} Z_T(\text{pu}) &= \frac{Z_t}{Z_d} = \frac{2,31}{17,305/1000} \\ &= 1336 \text{ pu} \end{aligned}$$

Sistem distribusi besar sudut daya (δ) umumnya sekitar 3° sehingga impedansi total keadaan motor diasut dengan $\cos \phi_{st} = 0,2$ dinyatakan dengan $Z_T = 1336 \angle 78,46^\circ \text{ pu}$.

Jika Z_{sst} adalah jumlah impedansi penghantar ke motor maka:

$$\begin{aligned} Z_{sst} &= 42,37 + j72,27 + 6 + j60 \\ &= 140,87 \angle 69,92^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

Impedansi paralel motor dan kapasitor (Z_{mc}) seperti persamaan:

$$\begin{aligned} Z_{mc} &= Z_T - Z_{sst} \\ &= 1336 \angle 78,46^\circ - 140 \angle 69,92^\circ \\ &= 1187 \angle 79,32^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

Tegangan motor waktu pengasutan dapat dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned} V_{st} &= \frac{Z_{mc}}{Z_{mc} + Z_{sst}} \times 100\% \\ &= \frac{1187 \angle 79,32^\circ}{1187 \angle 79,32^\circ + 140 \angle 69^\circ} \times 100\% \\ &= 89\% > 80\% \end{aligned}$$



berarti terjadi kenaikan tegangan dari 80% ke 89% akibat penggunaan kapasitor. Dari perhitungan telah diketahui bahwa $Z_m = 537,42$ pu dan $Z_{mc} = 1187$ pu, sehingga faktor Z_m/Z_{mc} dapat ditentukan yaitu:

$$\frac{Z_m}{Z_{mc}} = \frac{537,42}{1187} = 0,45 = 0,45$$

Selanjutnya dengan merujuk faktor tersebut ke kurva karakteristik Z_m/Z_{mc} pada Gambar 4 maka diperoleh angka koreksi sebesar 60%, yang berarti bahwa untuk membatasi kapasitas pengasutan agar tidak melebihi 7500 kVA, maka kapasitor harus menyuplai daya reaktif sebesar 60% dari harga sebelumnya. Sebelum kapasitor diketahui kVA pengasutan adalah 18603,728 kVA, sehingga pada faktor daya 0,2 besar daya reaktif yang dibutuhkan dapat ditentukan yaitu:

$$\text{KVAR-pengasutan} = 18603,728 \sin 78,46 = 18213,05 \text{ kVAR.}$$

Sehingga daya reaktif yang disediakan kapasitor adalah:

$$\text{KVA (c)} = 60\% \times 18213,05 = 10927,83 \text{ kVAR.}$$

Kemudian dari kurva karakteristik Z_m/Z_{mc} dapat dilihat adanya kenaikan faktor daya motor dari 20% menjadi 45%.

Impedansi kapasitor yang digunakan dalam per unit pada dasar daya 10.000 MVA adalah:

$$\begin{aligned} Z_c &= \frac{\text{KVA}_d}{\text{KVAR(c)}} = \frac{10 \times 10^6}{10927,8} \\ &= 915,097 \text{ pu} \end{aligned}$$

atau

$$Z_c = 1,584 \text{ ohm}$$

4. KESIMPULAN

Dari analisis perhitungan dapat disimpulkan bahwa pengasutan motor dengan kapasitor memberikan keuntungan antara lain menurunkan kapasitas pengasutan dengan menurunkan kebutuhan daya reaktif menjadi 10927,83 kVAR dari 18213,05 kVAR atau turun menjadi 60%. Tegangan system jaringan lebih stabil karena tegangan motor waktu pengasutan adalah sebesar 89% diatas batas ketentuan sebesar 80%. Kemudian, berdasarkan kurva karakteristik Z_m/Z_{mc} terjadi kenaikan faktor daya motor waktu pengasutan menjadi sebesar 45% dari 20%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Abdul Kadir. *Mesin Tak serempak*. Jakarta. Penerbit Jambatan. 1996.
- [2]. Hasan Basri. *Sistem Distribusi Daya Listrik*, Jakarta. Penerbit ISTN. 1997 hlm 84-105.
- [3]. Kamaraju *Electrical Power Distribution Systems*, New Delhi Tata McGraw-Hill Education Private Limited, 2009 hlm 44-59.
- [4]. I.J. Nagrath. *Modern Power System Analysis*. New Delhi Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. 1996 hlm 274-257.
- [5]. Ts. Soelaiman. *Mesin Tak Serempak Dalam Praktek*. Jakarta. P.T. Pradnya Paramita. 1996 hlm 87-98.
- [6]. Smeaton. *Motor application and Maintenance Handbook*. New York McGraw-Hill Book Company. 1990 hlm 411-423.
- [7]. Theodore Wildi. *Electrical Machines, Drivers, and Power Systems*. New Jersey. Prentice-Hall International, Inc. 1997 hlm 51-63.
- [8]. Yon Rijono. *Dasar Teknik Tenaga Listrik*, Yogyakarta Penerbit ANDI. 1997. hlm 280-287.